

УДК 621.793.3

С.В. Олексієнко, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

В.О. Мартиненко, канд. техн. наук

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна

Р.А. Куликовський, канд. техн. наук

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОПЕРЕНОСУ НА ДИФУЗІЙНУ КІНЕТИКУ В СИСТЕМІ Al-Si-Al**С.В. Олексієнко**, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

В.А. Мартыненко, канд. техн. наук

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина

Р.А. Куликовский, канд. техн. наук

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕНОСА НА ДИФУЗИОННУЮ КИНЕТИКУ
В СИСТЕМЕ Al-Si-Al****Serhii Oleksiienko**, PhD in Technical Sciences

Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

Volodymyr Martynenko, PhD in Technical Sciences

The Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Ruslan Kulykovskiy, PhD in Technical Sciences

Zaporizhia National Technical University, Zaporizhia, Ukraine

**INFLUENCE OF ELECTROMIGRATION ON DIFFUSION KINETICS
IN THE SYSTEM Al-Si-Al**

Представлена робота присвячена вивченню контактного плавлення в системі алюміній-кремній-алюміній. Досліджується вплив електричного струму на кінетику контактного плавлення. Встановлено вплив тривалості та напрямку протікання постійного електричного струму на розподіл елементів у з'єднанні.

Ключові слова: алюміній, кремній, контактне плавлення, електроперенос, розподілення елементів.

Представленная работа посвящена изучению контактного плавления в системе алюминий-кремний-алюминий. Исследуется влияние электрического тока на кинетику контактного плавления. Установлено влияние продолжительности и направления протекания постоянного электрического тока на распределение элементов в соединении.

Ключевые слова: алюминий, кремний, контактное плавление, электроперенос, распределение элементов.

Presented work is dedicated to examination of contact fusion in the system aluminium-silicon-aluminium. The influence of electric current on contact fusion kinetics is investigated. The influence of continuance and electric current direction on distribution of elements in joining is determined.

Key words: aluminium, silicon, contact fusion, electromigration, distribution of elements.

Постановка проблеми. Контактно-реактивне паяння є одним із різновидів капілярного паяння, при якому рідка фаза (припій) утворюється і розтікається між поверхнями, що паяються, у процесі так званого контактного плавлення при температурі, яка нижче температури плавлення матеріалів, що з'єднуються.

Контактно-реактивне паяння можливе між металами та сплавами, які утворюють між собою безперервний ряд твердих розчинів, температура плавлення яких безперервно знижується в порівнянні з температурою плавлення компонентів, або достатньо легкоплавку евтектику [1].

Останніми роками контактано-реактивне паяння, завдяки його особливостям, що дозволяють вести процес без використання сольових флюсів з доволі точним дозуванням кількості рідкої фази, стало одним із найбільш перспективних і прогресивних процесів. У цьому випадку нероз'ємні з'єднання забезпечують суттєве підвищення їх міцності, пластичності та корозійної стійкості. Велике значення надається контактано-реактивному паянню магнієвих, титанових і, зокрема, алюмінієвих сплавів.

У процесі оцінювання придатності матеріалу для контактано-реактивного плавлення й утворення евтектики дуже важливе значення мають вміст його в евтектиці, гранична

розчинність при заданій температурі в евтектиці, а також пружність випаровування компонентів у вакуумі. При утворенні евтектик, багатих на метал, що з'єднується, активація поверхні може відбуватися і без суттєвого перегріву над евтектичною температурою. Зі збільшенням вмісту в евтектиці алюмінію підвищується її температура плавлення, що також активізує процес контактнореактивного плавлення [2]. На рис. 1 представлені дані про вміст алюмінію з деякими металами. Найбільш багаті алюмінієм евтектики з кремнієм та нікелем.

Однак через досить високу температуру плавлення евтектики *Al-Ni* (913 K) від місць контакту розвивається не тільки загальна, але і локальна ерозія по границях зерен основного металу, яка важко піддається регулюванню. Разом з цим через труднощі з підтриманням постійності температури при такій надто високій температурі можливе оплавлення алюмінієвої деталі.

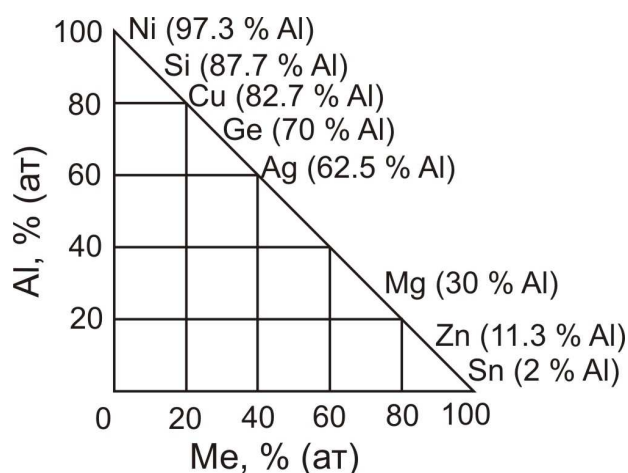


Рис. 1. Вміст алюмінію в евтектиках з деякими металами [2]

З цієї причини та з урахуванням усіх перерахованих вимог, найбільш придатним для отримання евтектичного прошарку на поверхні алюмінієвої деталі є кремній. Евтектика алюмінію з кремнієм містить 87,7 % (ат.) алюмінію і має температуру плавлення 850 K.

Під час контакту з кремнієм процес активування може сповільнюватися через високу стійкість плівки його оксиду. Внаслідок слабкої здатності кремнію випаровуватись у вакуумі $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па при температурах плавлення евтектики для контакту кремнію з алюмінієм через розриви у плівці Al_2O_3 необхідне щільне притискання [2].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Використання високих зусиль осадки вимагає проведення процесу контактнореактивного паяння із застосуванням формуючих пристроїв, які дозволятимуть обмежувати пластичну деформацію алюмінієвих деталей. Очевидно, що у випадку виготовлення складних за конфігурацією виробів таке застосування формуючих пристроїв буде ускладненим чи взагалі неможливим.

Зменшення величини стискаючого зусилля до значення 0,1 МПа при контактнореактивному паянні сплаву АМц з нанесеним на його поверхню кремнієм термовакуумним напиленням чи через порошок кремнію у вакуумі $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па, за даними роботи [1], дозволяє досягти лише локального плавлення сплаву АМц у контакті з частками кремнію. За даними роботи [2], розвиток хімічної ерозії сплаву АМц на глибину 35 мкм при контактуванні з кремнієм у вакуумі $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па відбувся лише через 740 с.

Таким чином, для якісної реалізації контактнореактивного паяння необхідно розробити засоби інтенсифікації процесу, які б дозволили забезпечити прискорення процесу контактного плавлення без використання надмірних стискаючих зусиль.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [2] процес контактнореактивного плавлення розглядається як такий, що складається з двох стадій:

- 1) утворення на поверхнях контактуючих кристалічних тіл твердих розчинів та їх плавлення;
- 2) розчинення твердих контактуючих тіл у рідині, яка утворилась, склад якої близький до евтектичного.

У наступних роботах більшості авторів така модель процесу була покладена в основу розрахунків, які зводились до визначення швидкості дифузії спочатку в твердій, а потім у рідкій фазах, у стаціонарних, а потім у нестаціонарних умовах.

Оскільки дифузію в твердому стані можна розглядати як підготовчу стадію утворення на поверхнях контактуючих тіл твердих розчинів чи прошарків хімічних з'єднань, то первинною задачею, з огляду на тривалий час утворення евтектики в зоні контакту кремнію з алюмінієм, є її прискорення.

Проведений огляд технічної літератури та публікацій дозволив встановити, що у процесі зварювання в твердій фазі різнорідних пар металів прискорення дифузійних процесів досягається за рахунок пропускання через з'єднання постійного електричного струму [3; 4; 5]. У роботах вказується на те, що позитивний потенціал прикладають до металу, який має менший атомний радіус, а також на те, що під дією електричного струму відбувається електродифузія атомів металу з більшим атомним радіусом.

Мета статті. Дослідження впливу постійного електричного струму на процес контактного плавлення в системі алюміній-кремній-алюміній.

Виклад основного матеріалу. Досліди проводили на зразках з алюмінію марки АД00 розмірами $8 \times 8 \times 10$ мм, товщина кремнієвих пластин марки КЭФ-4,5/0,1 (напівпровідник *n*-типу) становила 0,15 мм. Підготовка поверхні алюмінієвих зразків, які підлягали з'єднанню, полягала у знятті шабером приповерхневого шару товщиною $\sim 0,2 \div 0,3$ мм і в наступному знежирюванні ацетоном. Поверхня кремнієвих пластин перед використанням піддавалась тільки знежирюванню. Дослідження проводились у вакуумній камері модернізованої установки УВН-2М-1 при глибині розрідження $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па, температурі 853 К та питомому тиску 0,1 МПа. Навантаження на зразки створювалось за допомогою механічного приводу типу гвинт-гайка через пружину, що дозволило зафіксувати момент утворення рідкого прошарку за показаннями індикатора годинникового типу.

Робота виходу алюмінію $\chi_{Al} = 4,25$ eВ, робота виходу кремнію $\chi_{Si} = 4,8$ eВ [6], тому під час контактування металу з напівпровідником *n*-типу електрони з металу переходять у напівпровідник і утворюють в контактному шарі напівпровідника від'ємний заряд. Таким чином, бар'єрний шар не утворюється – контактний шар напівпровідника володіє підвищеною провідністю в обох напрямках [7].

За даними роботи [8], при порівняно малих густинах струму $j \approx 0,1$ А/мм² електроперенос через рідкий прошарок співрозмірний з дифузією при контактному плавленні. Тому в процесі досліджень використовувалась густина струму $j \approx 0,2$ А/мм².

Мікрошліфи з'єднань для металографічних досліджень виготовляли за стандартною методикою з використанням алмазних паст. Травлення зразків здійснювали в суміші плавикової та азотної кислот (2:1 об'ємних часток). Мікроструктуру з'єднань та хімічний склад ділянок з'єднань досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопа РЭММА-102-02.

На підставі проведення дослідів, схема якого наведена на рис. 2, а, коли до нижньої алюмінієвої деталі підключали «–», а до верхньої «+», встановлено, що контактне плавлення відбулось через 90 с, а нижній зразок був підплавлений більше (рис. 2, б).

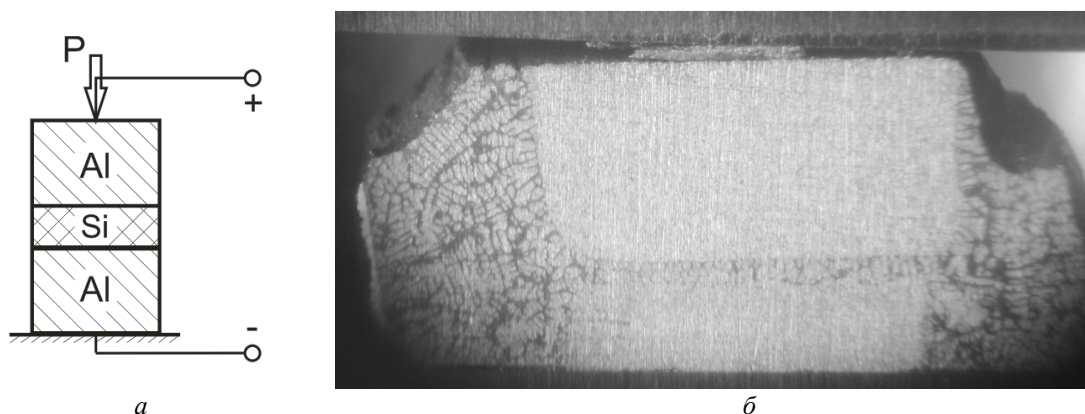


Рис. 2. Контактно-реактивне плавлення: а – схема дослід; б – зовнішній вигляд шліфа з'єднання

Дійсно, в нашому випадку кремній, атомний радіус якого рівний $0,134 \text{ нм}$ і менший за атомний радіус алюмінію ($0,143 \text{ нм}$) [6], щодо нижньої алюмінієвої деталі знаходився під позитивним потенціалом, що і пояснює більшу швидкість контактного плавлення.

На рис. 3 представлений результат растрової електронної мікроскопії зони з'єднання. Характер розподілення елементів, зокрема кремнію, в закристалізованому евтектичному прошарку залежно від часу витримки при дії постійного електричного струму наведений на рис. 4. Напрямок досліджень зліва направо (рис. 3) відповідає напрямку зверху вниз, як показано на рис. 2, а.

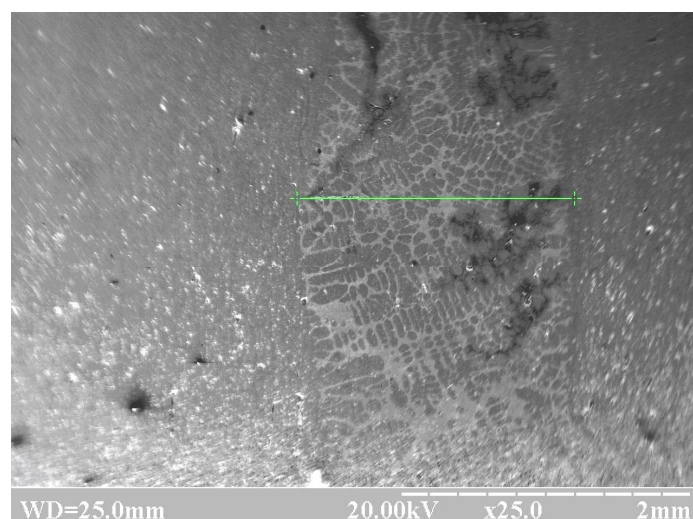


Рис. 3. Растрова електронна мікроскопія зони з'єднання

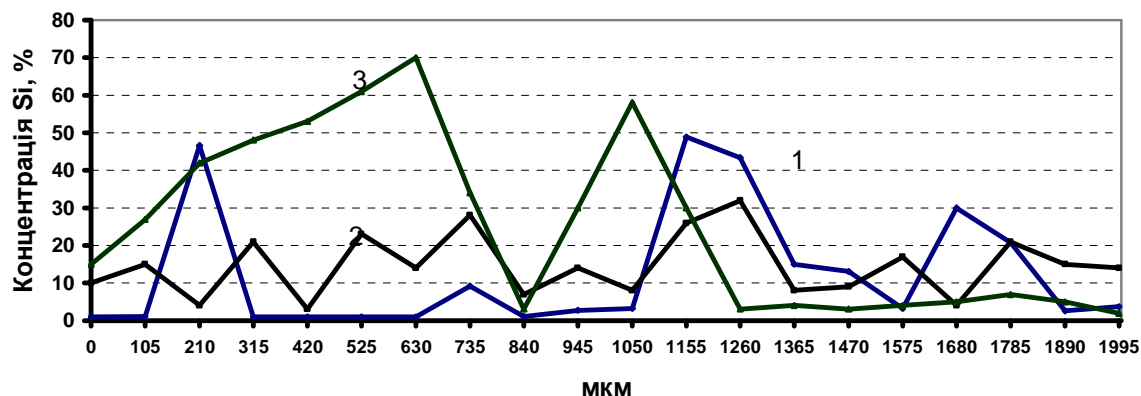


Рис. 4. Розподілення кремнію по евтектичному прошарку: 1 – 90 с; 2 – 1800 с; 3 – 3600 с

Такий характер розподілення ми пояснюємо тим, що кремній володіє більшою електронегативністю, ніж алюміній (1,8 у кремнію проти 1,5 у алюмінію) [6]. Таким чином, іони кремнію з більшою густиною від'ємного заряду в рідкому прошарку рухаються до позитивного потенціалу.

Висновки і пропозиції.

1. Визначено можливість прискорення процесу контактного плавлення в системі Al-Si-Al за рахунок дії постійного електричного струму, що проходить через з'єднання. При густині струму $0,2 \text{ А/мм}^2$, глибині розрідження $1,33 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$, температурі 853 К та питомому тиску $0,1 \text{ МПа}$ час утворення евтектики становить 90 с , що приблизно у 8 разів швидше, ніж без дії постійного електричного струму.

2. Відомо, що працездатність зварного з'єднання, в якому є ділянки з різними властивостями металу, визначається не тільки абсолютними значеннями механічних характеристик металу зразків, вирізаних з різних ділянок, але і співвідношенням властивостей і розмірів цих ділянок. Тому у процесі виготовлення контактнореактивним паянням прецизійних виробів з алюмінію та його сплавів через неможливість регулювання у широких межах термодформаційного циклу оброблення з'єднань струмом, що проходить через них, може стати ефективним засобом забезпечення заданого рівня механічних характеристик виробу.

Список використаних джерел

1. Лашко Н. Ф. Контактнореактивная пайка / Н. Ф. Лашко, С. В. Лашко // Сварочное производство. – 1969. – № 11. – С. 34-37.
2. Лашко Н. Ф. Контактные металлургические процессы при пайке / Н. Ф. Лашко, С. В. Лашко. – М. : Металлургия, 1977. – 192 с.
3. А. с. 124781 СССР, МКИ³ 49 34. Способ соединения керамических и металлических деталей / Н. Ф. Казаков, Б. Н. Золотых (СССР) ; опубл. 1959, Бюл. № 23.
4. Пат. 3256598 США, МПК⁷ 29-484. Diffusions Bonding / I. R. Kramer, Ch. F. Burrows ; опубл. 21.06.66.
5. А. с. 332975 СССР, МКИ³ В23 К 21/00. Способ получения сварного соединения сваркой давлением в твердом состоянии / М. Л. Финкельштейн, Е. И. Феликсон, А. В. Андрюшкин и др. (СССР) ; опубл. 24.04.72, Бюл. № 11.
6. Физика твердого тела : энциклопедический словарь : [в 2 т.] / гл. ред. В. Г. Барьяхтар [и др.]. – К. : Наук. думка, 1996. – Т. 1. – 656 с.
7. Трофимова Т. И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1990. – 478 с.
8. Влияние электропереноса на кинетику контактного плавления / И. В. Рогов, А. А. Ахкубеков, П. А. Савинцев, В. И. Рогов // Металлы. – 1983. – № 2. – С. 66-68.